

砂の微視的構造と変形特性に関する実験的研究

東北大学大学院 学生員 ○伴 一 考
同 工学部 正 員 柳 沢 栄 司

1. はじめに

元来砂は、非粘着性粒子の集合体と考えられ、原地盤における堆積条件による粒子配列や分布の差によって、材料の不均質性、異方性を生じる。従って、当然応力～歪関係へも影響を与え、又 N 値に反映し、現場における設計、施工時の問題となっていることも報告されている。このような事情から、微視的構造を考慮した砂の力学的特性に関する研究が必要とされている。本報告では、三軸応力条件において、いくつかの応力状態を与え、各応力状態における砂状試体の微視的構造変化を直接観察し、いくつかの知見を得たので報告する。

2. 試料及び実験方法

用いた試料は、名取川下流域から採取した川砂であり、図-1に粒度分布を、表-1に物理定数を示す。ここで軸比 $\bar{n}$ は、小田¹⁾によるものであり、 C_{max} , C_{min} は、土質工学会で制定された試験法による。

供試体に初期構造の差を与える為に、Mullis²⁾の手法に従って「Air Pluvial法」と「Moist Tamping法」の2法によって、平均初期間ゲキ比 $e_0=0.78$, 平均初期相対密度 $D_{ro}=68\%$ で $\phi=50\text{mm}$, $h=120\text{mm}$ の供試体を作製した。

用いた三軸圧縮試験装置は、軸圧、側圧を空気圧によって与える応力制御型のものである。この装置を用いて、排水条件にて次の各応力経路を実行し、指定されたいくつかの応力状態において、供試体内部の粒子配列を固定させる為に、ポリエステルレジン溶液を用いて供試体を固結させた。

実行された応力経路は、以下に示す三種類である。

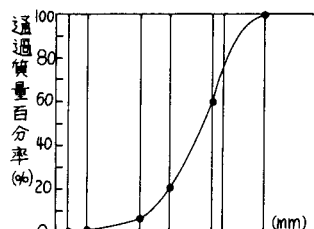
経路[A]: $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=1\text{kgf/cm}^2$ で等方圧密後、平均主応力一定条件で、圧縮
載荷→除荷→伸張載荷の静的繰返し試験

経路[B]: $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=1\text{kgf/cm}^2$ で等方圧密後、平均主応力一定条件で伸張載
荷試験

経路[C]: 軸比一定の異方圧密試験

それぞれの応力経路を P - q 平面で図示すると図-2になる。図-2の黒丸番号は、固結供試体を作製した応力状態を示す。

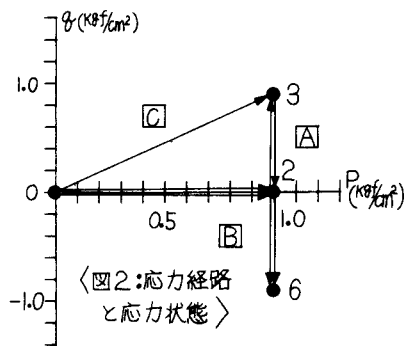
又、試料の固結に用いた薬品及び1回の試験ごの使用量(混合比)は、1)不飽和ポリエステルレジン(500g) 2)ステレン(100g) 3)有機過酸化化物(3cc)である。不飽和ポリエステルレジンは、粘性が比較的高いので、ステレンによって粘性が減じられるが、多いと固結時の強度が低下する。一方有機過酸化化物は、触媒として固結時間の調整に用いられ、量が多いと発熱によって亀裂を生じるので注意を要する。以上の物性を考慮すると、上記の混合率の時着液の粘性及び固結時の強度が秀れているようである。このようにして、ポリエステルレジン溶液で飽和された供試体は、30分～60分で所定の応力状態まで載荷された後、夏期で6～8時間、冬期で12～14時間、十分固結するまでその応力状態を保持したままでおかれる。そ



〈図1: 試料の粒度分布〉

比重 G_s	最大間隙 比 C_{max}	最小間隙 比 C_{min}	有効径 $D_{10}(\text{mm})$	均等係数 D_{60}/D_{10}	軸比 $\bar{n}$
2.68	1.03	0.66	0.32	2.66	0.47

〈表1: 試料の物理定数〉



〈図2: 応力経路と応力状態〉

の後、三軸圧縮試験装置から取り出され更に12時間程度が乾燥された。

3. 微視的構造の測定法及び結果

前述の手法によって作製された固結状試体内部の粒子配列構造を直接観察する為に、試体をダイヤモンドソーで切断し、岩石薄片作製と同様な手法を用いて水平断面(H断面)と垂直断面(V断面)の薄片を数枚作製した。小田³⁾の実験によれば、三軸圧縮試験の場合、変形初期から試体の中央1/3部分では、残りの部分に比較して顕著な間ガキ変化を生じる事が示されており、各断面を切り出す位置は試体中央1/3に入る部分とした。

この様にして得られた薄片を岩石顕微鏡にて写真撮影を行ない、その写真から各応力状態における試体内部の粒子配列構造を、見かけの長軸方向分布と接点における見かけの接面の法線方向分布について二次元的に観察した。

図3、4に各々V断面、H断面での各応力状態に関する見かけの長軸配列の集中度 L_0 の変化を示す。ここで集中度 L_0 は、Cunnay⁴⁾のベクトル法によって計算されるもので、ランダム配向に近づく程0に近づき、定配列に近づく程1に近づく。この図からわかるように、試体の作製法によって初期構造の差があらわれ、moist tamping法

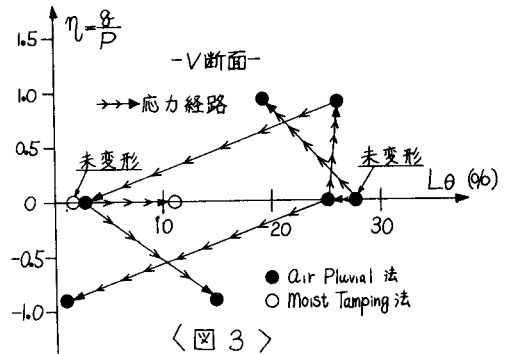
によるものは非常にランダムな構造をもつ。しかし、等方圧密によってその差は縮まる。又、圧縮除荷過程及び伸張載荷過程では、反縮除荷過程に比べて両断面とも見かけの長軸配向分布に顕著な変化を生じている。

一方小田³⁾によれば粒子間接点における接面の空間配向分布も重要な微視的構造因子であり、具体的には構造指標 S_z/S_x によって表現されることになる。 S_z/S_x を求めるには、接面における法線 N_i の三次元方位角の確率密度分布 $E(\alpha, \beta)$ が必要となる。本研究では、V断面、H断面における二次元的な見かけの法線方向分布に確率統計的処理を加えて $E(\alpha, \beta)$ を求めた。このようにして求めた $E(\alpha, \beta)$ を用いて計算した S_z/S_x 値を表2に示す。この表から、試体の作製法による初期構造の差は等方圧密によって消えるが、異方圧密では、いくらか保持されることがわかる。又、圧縮除荷及び伸張載荷においても S_z/S_x は増え続け減少しないことがわかる。

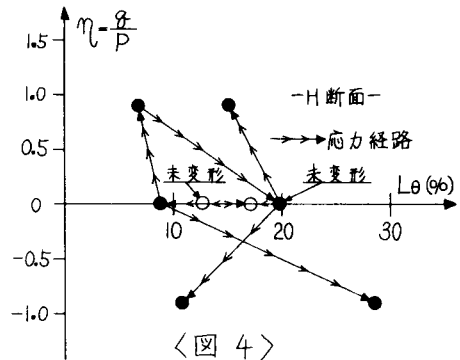
4. おわりに

以上の結果から次の事がわかる。①初期構造で異方性を生じているものでも、等方圧密によってその異方性が消える可能性がある。②圧縮除荷時は弾性的挙動を示すと言われているが、微視的に見ると粒子の回転がかなり生じている。③圧縮除荷や伸張載荷のように主応力の反転が生じる場合、 S_z/S_x だけでは構造変化を説明し得ない。

参考文献) 1) M.Oda(1972): "Initial Fabric and Their Relations to Mechanical Properties of Granular Material", Soils & Foundations, Vol.12, No.1, pp17~36, 2) Mullis and. (1978): "The Effects of Method of Sample Preparation on the Cyclic Stress-Strain Behavior of Sand", EERC report No.78-18, 3) M.Oda(1972): "Deformation mechanism of Sand in Triaxial Compression Tests", Soils & Foundations, Vol.12, No.4, pp45~63, 4) Curry, J.R. (1956): "Analysis of Two-Dimensional Orientation Data", Jour. Geol., Vol.64, pp 117~131, 5) M.Oda(1972): "The mechanism of fabric change during compressional deformation of sand", Soils & Foundations, Vol.12, No.2, pp1~18, 6) 梓: "砂の微視的構造と変形特性に関する研究", 東北大学修士学位論文(1981)



〈図3〉



〈図4〉

試体作製法	試験条件	S_z/S_x
Air Pluvial	未変形	1.42
"	等方圧密	1.13
"	A-3	1.16
"	A-2	1.18
"	A-6	1.21
"	B-6	1.17
"	C-3	1.29
Moist Tamping	未変形	1.07
"	等方圧密	1.17

〈表2: 各応力条件における S_z/S_x 値〉